专题：行星科学——新学科·新梦想
Planetary Science: New Discipline, New Dream

# 行星地质学：地质学的“地外”模式

李雄耀[1]　林　巍[2]　肖智勇[3]　唐　红[1]　赵宇鴳[1]　曾小家[1]
1 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081
2 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029
3 中国地质大学（武汉） 武汉 430074



**摘要** 行星地质学是从天文学和地质学中发展形成，借鉴传统地质学的方法和手段研究太阳系中行星、卫星、小行星、彗星和行星环等固态天体的形成和演化过程的一门交叉学科。其研究领域随着太阳系探测的发展而不断拓展，涵盖行星固体圈、行星表面环境、行星资源以及生物或适生环境演化等多个方面。行星地质学与月球和深空工程探测相辅相成，工程探测为学科的发展提供了重要的研究基础，而行星地质学的新发现又能很好地促进工程探测的实施。但目前我国行星地质学的发展还相对落后，在研究平台和研究队伍上仍存在很多短板。行星地质学是跳出地球看地球，进一步比较、拓展、深化和推动地球科学的创新发展。随着国家深空探测科技战略的深入推进，行星地质学研究的制约愈发明显，需及早布局、大力发展，以满足学科发展和工程探测的迫切需要。

**关键词** 行星地质学，行星固体圈科学，行星环境科学，行星资源学，天体生物学

**DOI** 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.07.007

## 1 行星地质学简介

行星地质学是研究太阳系中行星、卫星、小行星、彗星和行星环等固态天体形成和演化过程的一门交叉学科，是在地质学和天文学发展过程中逐渐发展形成的[1,2]。

在地质学的研究中，通过逐步认识地球的组成和结构，地球及其生物演变的规律，特别是地壳和岩石圈运动规律，实现人类对地球的合理开发利用。但当我们研究地球的时候，不能忘记我们只是在和太阳系的一个代表行星打交道，我们所获得的认识放在整个太阳系可能只是一些局部的和片面的现象[3]。一个不争的事实是：我们只是从古生代开始才对地球有较为清楚的认识，对大约 40 亿年以前的地球历史几乎是一无所知，而地球和太阳系所有其他行星一样，是大约 46 亿年以前形成的。在地球的表面我们极少见到比 38 亿年更古老的岩石，因为它们在后期构造运动、岩浆活动、风化作用、流水侵蚀等地质作用下被严重

资助项目：中国科学院B类先导科技专项培育项目（XDPB11），中国科学院青年创新促进会优秀会员项目
修改稿收到日期：2019年6月14日

改造，导致传统地质学对研究地球早期演化过程显得束手无策。因此，必须将地球自身演化的问题置于整个太阳系的全局当中，从地球以外的其他天体上获得线索[4,5]。从16世纪中叶哥白尼提出“日心学说”开始，天文学经历了几百年的发展历程，从主要纯描述天体位置、运动的经典天体测量学，向着寻求造成这种运动力学机制的天体力学，再到研究天体的物理结构和物理过程的天体物理学方向不断发展。目前，我们不再把太阳系天体看成仅仅是一个运动的“点”，而是开始清晰地展现天体表面错综复杂的地质现象。大量详细地质现象和信息的获取为我们研究太阳系天体的演化过程提供了契机[6]。随着天体观测和空间探测的不断发展，地质学和天文学的契合程度越来越高。一方面，天文观测和太阳系探测需要利用地质学方法和积累的地学资料揭示观测现象、指导工程探测；另一方面，研究太阳系类地行星和其他天体的地质演化，将之与地球地质历史的研究相结合，可以阐明最难辨认的或我们还不知道的地质历史事件[7]。现在我们知道，所有类地天体都具有类似的形成及分异过程，研究月球、火星、金星时，我们实际也在类比研究地球的早期地质历史，而这些信息是不能仅从地球本身获得的。

随着空间探测的深入，太阳系天体的形成和演化过程已经成了地质学和天文学共同关注的问题，行星地质学的研究范畴也逐渐清晰[8]。20世纪60—70年代，美国和苏联的太空竞赛促进了月球探测的极大发展，高精度的地形数据、光谱数据以及载人探测、样品的返回深化了人类对月球环境、地貌特征、地质演化等方面的认识[9]。后续探测进一步将这些研究方法拓展到了火星、金星、小行星等太阳系其他天体上[10]。月球探测的深入已促使探测目标从认识月球转向利用月球。月球资源的开发利用在新一轮的月球探测热潮中成了一个重要目标[11]。伴随一系列工程任务的实施，地质学和天文学等基础科学的进一步发展逐步形成了行星地质学的基本框架。

## 2 行星地质学学科体系

行星地质学研究有助于认识太阳系及其天体的形成和演化、深入理解地球的演变过程、揭示地球生命起源及演化等重大科学问题[12,13]。当前，行星资源已成为世界各国共同关注的问题，是服务人类可持续发展和支撑未来深空探测活动的重要战略资源[14]。概括而言，无论是重大科学问题的突破，还是深空探测面临的实际挑战的解决，都需要建立和发展行星地质学这一新兴学科。根据不同的研究对象和目的，大致可将行星地质学的研究方向划分为：行星固体圈科学、行星环境科学、行星资源学和天体生物学（图1）。

### 2.1 行星固体圈科学

行星固体圈科学主要研究太阳系天体固体圈的物质组成、地质构造和形成演化等，研究对象包括所有类地行星、月球和其他具有固体表面的卫星、小行星、彗星和矮行星等天体。行星地质学的研究通常需要结合行星物理、行星化学等相关学科的数据资料，解决行星固体圈的地质运动规律、岩浆及火山活动、表面地质过程、热演化以及行星壳幔核分异过程和物质特性等科学问题。行星固体圈科学是地球岩石圈科学的延伸，并拓展到行星内部物质及演化过程的研究。二者的理论体系和研究方法具有相似之处，但也有一定的差别，主要体现在：天体内部热总量和热源分布与消耗的方式、天体的物质组分、数据获取的方式、研究目标的空间尺度等。

### 2.2 行星环境科学

行星环境科学主要研究天体表面环境特征及变化规律、空间—天体表面相互作用过程及天体表面环境演化历史等，涉及空间物理学、物理学、化学、天文学、大气科学和地质学等学科门类。行星环境科学是地球环境科学在空间上的扩展，但也区别于有生命活动参与的地球环境科学。研究对象包括太阳系内行

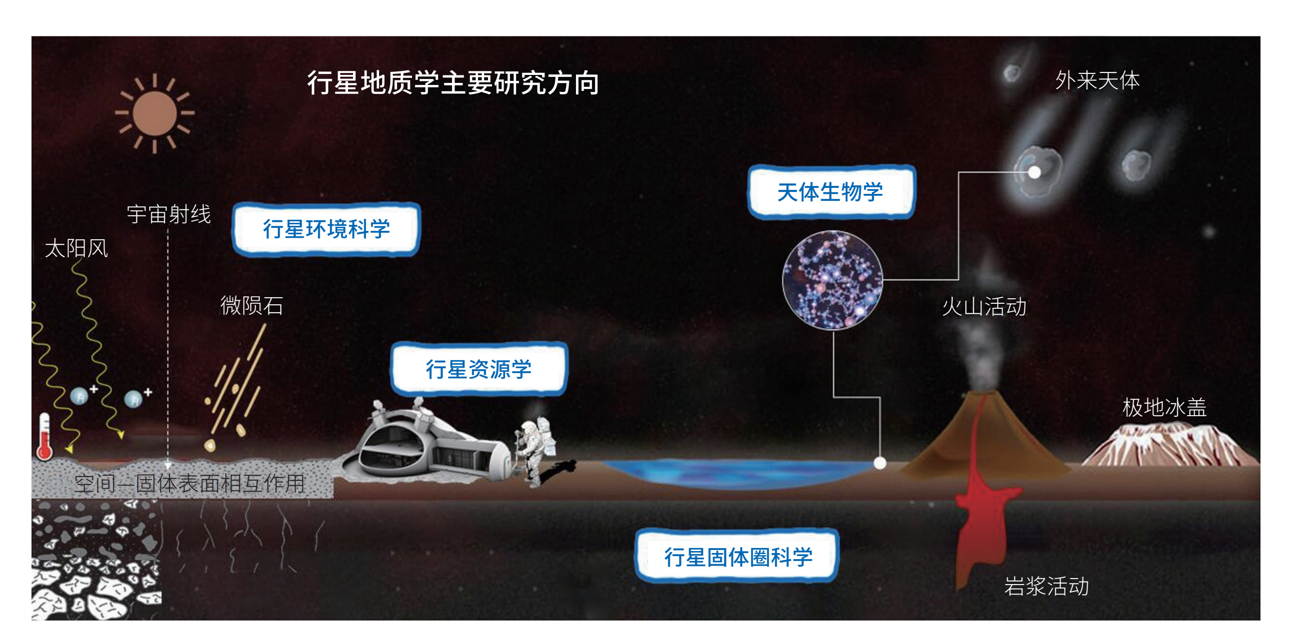



图 1　行星地质学研究方向示意图

星及其卫星、小行星和彗星。在科学层面，行星环境科学所关注的内容涉及行星近表层空间的辐射及其与固体表面作用过程、温度、热流、微陨石轰击、氧逸度、表土物质等要素的特征、相互作用过程及演变规律等。在应用层面，行星环境科学研究可为行星无人与载人探测活动、行星基地建设、行星资源开发利用、行星宜居性、行星际移民等人类可持续发展战略提供科学保障。

## 2.3 行星资源学

行星资源学主要研究地外天体自然资源分布、勘查及开发利用等。针对月球、类地行星、小行星、彗星等地外天体上可供人类利用的资源，开展地外资源勘查和评价，查明资源类型、特征、储量、分布规律与成因，研发地外资源提取和利用技术，并进行资源开发的工程地质评估与资源利用经济有效性评估等是行星资源学重点关注的研究主题。按照行星资源的属性，可划分为行星矿产资源、行星能源资源、行星气候资源、行星水资源、行星土地资源等。研究内容通常包括：① 行星资源地质特征研究。通过遥感探测、就位探测和样品返回分析等方法对地外资源进行勘查，获得其类型、赋存状态、储量、成因和分布规律等地质特征信息。② 行星资源评价。对行星资源的质量、品位、开发技术条件、工程实施难度、经济价值等进行综合评判。③ 行星资源开发利用技术。基于地球资源的开发利用技术，结合地外天体特殊环境及资源分布特征，研发可用于行星资源勘查、提取、处理、运输、加工、生产、循环利用等的先进技术。

## 2.4 天体生物学

天体生物学主要研究地球和太阳系各层次天体中生命起源和演化，并探索生命在宇宙中潜在分布和其未来发展趋势等，涉及天文学、地质学、生命科学等多个学科门类。研究主题涵盖地球生命的起源和早期演化、寻找并研究地外宜居星球（环境）和潜在生命形式、生命与环境协同演化、人为构建宜居环境等。为解决生命如何起源和演化、地外天体中是否存在生命、地球和地外生命的未来如何发展等重大科学问题，天体生物学逐步形成了地球生命非生物起源、太空中有机物起源、水-岩-碳相互作用、行星宜居性、生物标志物、生命在极端环境下潜在适应力等多个研究方向，对探索生命的起源及

演化具有重要指示意义。

## 3 行星地质学发展历史

行星地质学最早起源于天文学，并随地质学研究方法的渗透而融合发展。其发展历史可以划分为 3 个时期。

### 3.1 萌芽时期（17 世纪—1960 年）

行星地质学的萌芽始于 17 世纪望远镜发明之后，人类开始用望远镜观测月球和火星表面特征。这一时期研究以直观描述月球和火星表面的形貌特征以及猜测性成因解释为主[15]。1609 年，伽利略及其同事利用望远镜观察发现月球表面并不光滑，布满了山脉和火山口，并首次绘制发布了月球地图。随后多名科学家也利用望远镜观察绘制了不同版本的月球地图和火星地图。在月球地图上，月球表面暗色的地区被称为“海”，明亮的地区被称为“陆”；科学家对许多环形山进行了命名，提出了环形山是由小天体撞击形成的观点。在火星地图上，科学家描绘出火星表面大量狭窄的暗色“河道”、随季节变化的极区冰盖和尘暴等地貌特征，并开始对火星“河道”的成因进行研究。对月球和火星地貌特征及其成因的零星研究形成了行星地貌研究的萌芽，为行星地质学的产生创造了条件[15]。

### 3.2 奠基时期（1960—1994 年）

自 1960 年开始，频繁的太阳系探测和快速发展的月球科学为行星地质学的产生奠定了基础[4]。在此期间，行星地质学经历了从定性到定量、由浅至深、由零散至综合的发展历程，研究逐步趋于系统化，涉及行星固体圈科学、行星环境科学、行星资源学和天体生物学等相关内容[1]。对“阿波罗登月计划”时期太阳系探测任务获取了大量数据和样品以及陨石的研究，为深入开展行星地质学的研究提供了重要的物质基础[9]。特别是月球探测数据获取和月球样品返回，促进了月球岩石类型、矿物组成、地质构造特征、地形地貌、空间环境、内部结构和演化历史等一系列研究的突破[16]。同时人们认识到月球表面含有丰富的钛铁矿、克里普岩、氦-3 和太阳能等资源，可为人类社会的可持续发展作出贡献[11]。而工程探测的不断实施，也进一步促进了月球和火星表面环境研究的深入[17]。另一方面，“海盗号”火星探测器在火星表面开展的生物实验是人类首次在地外行星开展生命探测，促进了地外生命研究的发展[18]。上述研究发展和成果，丰富了行星地质学的研究内容，逐渐形成了行星地质学的基本框架。

### 3.3 形成和发展时期（1994 年至今）

1994 年以来，月球探测和深空探测进入了一个全新的时期，美国、欧洲、中国、日本、印度等多国都纷纷提出并实施了月球探测和深空探测计划[15]，其探测方案更加全球化、综合化和整体化，促进了行星地质学的快速发展。一方面，新时期的月球、火星和小行星等地外天体探测更加重视全球性和综合性，将行星的岩石矿物、地质作用和环境特征结合起来，综合分析行星的不同圈层结构特征及其相互作用关系，推断行星的形成和演化历史，逐渐完善了行星地质学的分析方法和研究内容。另一方面，新时期的月球和深空探测开始关注行星资源的开发利用、月球基地建设和宜居环境的探寻，把科学研究和工程技术结合起来，将多学科的研究方法和成果引入行星地质学[15]。目前，美国、欧洲、中国等都积极推动行星地质学的发展，在不少科研机构和大学均开设了行星地质科学的研究方向。

## 4 行星地质学研究方法

行星地质学研究通常采用多种研究手段和方法。根据研究途径，大致可划分为 3 种：探测方法（数据获取）、地质方法（类比/推理/假设）和行星制图法（行星地质图/综合性认知）（图 2）。

### 4.1 探测方法

探测方法是获得行星地质全球认识的有效手段，

是利用地基观测设备或通过向行星发射相关探测器获取行星物质组成、构造特征、浅层结构等地质信息的方法。根据任务的实现形式，通常包括：地基观测、环绕探测、着陆探测、巡视探测和载人探测[1]。

地基观测和环绕探测主要利用电磁波进行远距离探测，包括热红外、远/近红外、红外、可见光、紫外、极紫外、X 射线、γ 射线等，获取行星表面的影像、高程和形貌构造以及元素组成、岩石分布、表面环境特征等数据资料。

着陆探测和巡视探测则是利用探测设备在行星表面实现着陆点或着陆区域探测的方法。相对于环绕探测，该方法能获得高分辨率的精细地质资料和类似地球上野外地质工作所获取的着陆点综合信息。

着陆器/巡视器携带的科学载荷可以对着陆点的岩石矿物土壤及其所处的地质环境进行详细的描述和关键数据的测量，包括利用放大镜或微区成像技术，对土壤颗粒或岩石中不同矿物颗粒间关系开展细致观察。利用先进的自动采样和样品处理技术，可以使探测器实现就位实验。例如：“海盗号”获取火星表面土壤，并开展了 3 种就位生物实验，对生命进行探测；“凤凰号”在火星北极，对获取的土壤样品进行淋滤，并测量了淋滤液的化学组成；“好奇号”火星车的样品处理模块可以钻取岩石样品，并将粉末过筛后放入不同的分析组件进行矿物组成、化学成分、同位素组成等复杂的分析操作。

然而，再精细的无人机器人和科学载荷也无法实现类似地球实验室内，科研人员和综合分析平台可达到的深入程度。样品返回在地球实验室深入分析，是行星地质学实现突破的重要环节。例如，“阿波罗”带回的月球样品极大地促进了月球科学及行星科学的发展，也使月球成为行星科学中研究程度最为深入的天体和行星研究的基石。

此外，也可以通过开展载人探测任务，让宇航员在地外天体上完成仪器安装、地质勘查、样品收集和封装等探测任务，最终实现在地外天体表面长时间居留和对更远目标的探测。

### 4.2 地质方法

根据传统地质学的研究经验和方法，行星地质学研究通常涉及的地质方法包括：样品分析、类比研究、模拟实验和数值计算等[1]。

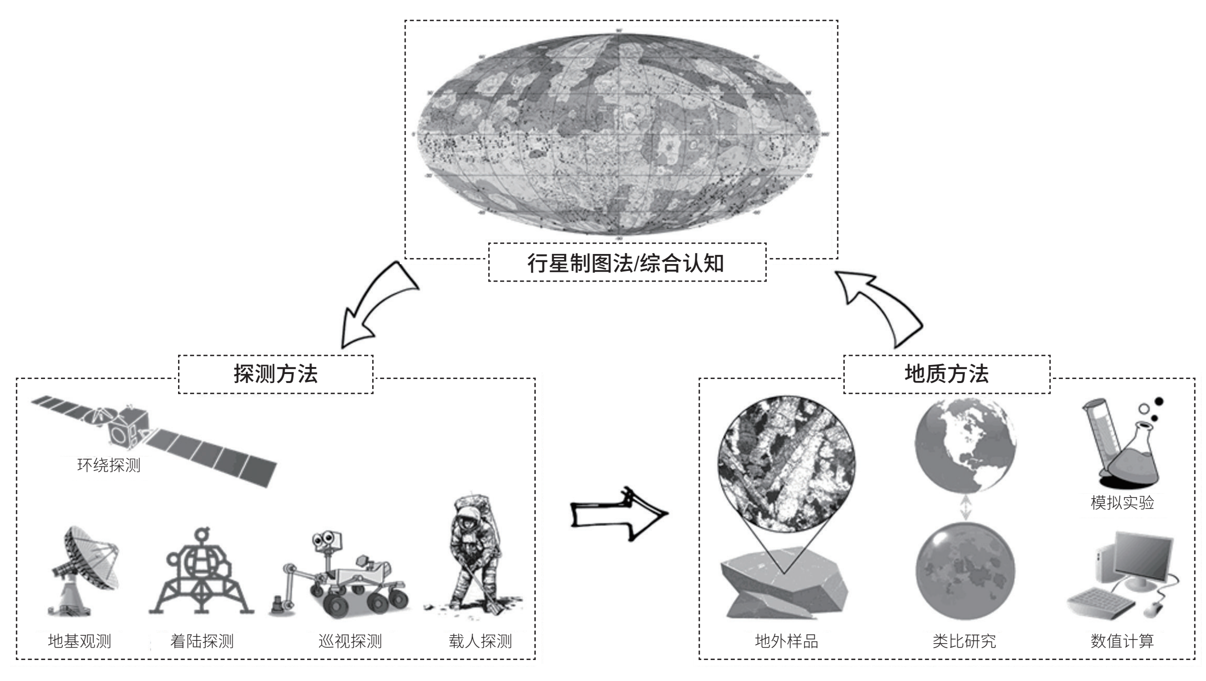



图 2　行星地质学研究方法示意图

利用多种先进的地球科学分析设备，对深空探测返回的地外样品及陨石样品，开展详细分析研究，能为认识行星地质过程及演化提供宝贵信息。类比研究则是参照地球已知的地质现象（如地球撞击坑）和地质方法（如层序方法）等，利用比较行星学的研究思维，开展类比研究，从而获得地外天体地质过程及演化过程的机理和新知。模拟实验是通过在地面实验室搭建模拟设施，实现相关地质过程和环境条件的模拟，以探索关键过程、关键边界条件和制约因素的一种方法。目前在揭示地外天体演化规律，探测数据解译，以及生命起源演化等方面都有广泛的应用。另外，针对行星地质的某些科学问题，如天体撞击过程、行星早期环境演化、行星表面的地质过程、重要矿物的形成和稳定等，也可以构建相关数学模型或热力学、动力学模型；并且可以通过模拟计算，深化对问题的研究和认识。虽然类比本身并不能直接提供对某一现象的完整解释，但可以促进问题的进一步调查和验证，使问题的研究得以深化或解决。

### 4.3 行星制图法

行星制图法通过地质图来总结和呈现地貌、地层、岩矿等的空间分布和时空关系。通过行星制图法获得的行星地质图（包括各类相关主题和要素的图件），是行星地质研究的基础。行星制图综合了该阶段所有可用的探测数据和分析结果、样品分析及认识、各类演化模型等资料，是行星综合性认识的直观体现[1]。这些针对某一天体或某一方面的综合性认知，可为未来行星探测规划、科学载荷设计、工程任务实施等提供指导。

## 5 未来展望

进入21世纪，为满足人类探索外太空的好奇心及人类社会可持续发展的需求，行星探测活动已逐步成了世界各航天大国的“竞技场”。美国、欧空局、日本等航天强国或部门都先后推出了各自的太阳系探测规划，引领着行星地质学的发展。当前，欧美行星地质学研究已经进入到定量化和精细化的阶段，对一些特定区域开展了综合性研究。例如，美国航空航天局（NASA）开展了“Mars 2020”火星探测器预选着陆区的地质、水文、气象等方面的综合研究[19,20]，月球南极-艾肯盆地的遥感地质学特征综合研究[21]，以及水星南北极永久阴影区水冰的多探测方式深度研究[22]等。而对一些具体的地质过程研究，如高速撞击、火山活动、冰川活动、沙丘运动等，国际上已形成了各自的研究群体，并召开专门的定期/不定期的学术会议。另外，日本在行星地质学的研究方面极具特色，并在多个小行星探测任务的驱动下，在低速撞击领域以及小天体的地质学研究上取得了较为系统的成果[23]。

相比而言，我国在行星地质学研究领域的发展较为缓慢。1978年，欧阳自远利用美国总统卡特赠送的1克月岩样品开展了月球地质的研究，编著了《月质学研究进展》，开创了我国行星地质学研究的先河。但是，受制于我国当时的经济和科技发展水平，未能开展相应的空间探测任务，研究资料严重匮乏，以致这一学科长期裹足不前。随着我国社会的巨大进步和科技实力的增强，尤其是以2007年10月24日“嫦娥一号”月球探测器发射成功为标志和起点，我国地球科学家可以利用第一手探测数据来进行月球地质研究[24]。随着“嫦娥工程”与其他深空探测任务的成功实施和推进，我国行星地质学正在快速发展，已初步形成了一定规模的研究群体。但是，由于起步较晚，从“嫦娥工程”立项开始仅有不到15年的发展历史，行星地质学的研究在广度和深度上与欧盟、美国、日本等发达国家和地区相比均存在较大差距，整体科研水平还处于跟跑阶段。

我国积极参与深空探测将获得第一手行星地质数据，国际深空探测计划的持续实施和数据的广泛共享为中国科学家参与行星地质学的研究提供了广阔

空间，同时也为研究和认识地球提供了新的和更全面的视野。有利的研究条件吸引了一批青年人投身行星地质学的研究，从事天体表面环境过程、月球早期演化、火星地貌等方面的研究，这有望使我国在国际行星地质学领域占据一席之地。

但我们也应该清醒地认识到行星地质学发展中存在的问题：① 就当前而言，科学研究和工程探测存在“两张皮”的现象，科学研究成果不能有效指导工程任务实施，工程探测成果不能很好支持解决基础科学问题，未能形成相辅相成的有机整体；② 科学问题的研究更多地在追随国外同行，缺乏从“0”到“1”的原创性研究，难以取得引领性突破；③ 培养体系不完善，人才队伍严重不足。在深空探测国家科技战略实施过程中，不论是基础科学研究人员还是工程技术研究人员，都普遍实行“5+2”“白+黑”的工作模式，一个人需要完成几个人的工作。

我国行星地质学的发展需要有效摆脱上述困境，营造一个良好的科研环境，努力实现以下 3 点。

（1）完善科研平台，促进科学与工程的有机结合。与传统地质学不同，行星地质学更多地依赖遥感探测和样品返回，海量的数据处理和高精尖的样品分析是其研究过程的一个重要特征。研制数字行星研究平台、配置高精尖分析设备、开发地外样品的特殊分析方法，建立系统高效的科研平台，可以更好地服务于行星地质学的研究，获取更多科学新发现，促进我国行星地质学的发展。同时，科学新发现将更好地指引工程探测的发展方向，推动具有重大科学意义的工程任务实施，为重大科学问题的解决提供更好更多的探测数据或者实际样品，使科学研究与工程探测相互促进，形成良性发展局面。

（2）发展前沿方向，抢占学科新领域的发展先机。经过几十年的发展，行星地质学的目标已经开始从认识行星逐步转向利用行星。最近几年，与开发利用太空资源密切相关的行星环境科学和行星资源学逐渐发展起来，成为行星地质学的重要前沿方向。此外，海量数据的积累促使行星科学的研究更加强调数据集成和综合利用，研究方法开始进入以大数据驱动创新发现的新模式。改变我国行星地质学长期处于跟跑阶段的现状，需要抓住新兴的学科方向，以行星环境科学和行星资源学作为切入点，与欧盟、美国、日本等发达国家和地区一起起跑，并通过加强布局和投入，创新研究方法，实现未来的整个学科方向赶超和引领。

（3）扩大人才队伍，健全行星地质学的培养体系。我国开展行星地质学研究的单位仅限于中国科学院、部分高校以及中国地质科学院等为数不多的几家，专门的研究机构和部门更是少之又少。科研人员的数量也严重不足，多为“半路出家”，这一现状与美国“阿波罗登月计划”时期的状况相似。由于工程任务的需要，吸引了部分从事传统地质学研究的科研人员转向从事行星地质学研究，但并未形成一个完整的行星地质学人才培养体系。这一局面不但导致人才队伍体量较小，也缺乏可持续性。因此，开设行星地质学教育培养课程，健全人才梯队培养体系，是扩大人才队伍、发展行星地质学的关键之一。

## 参考文献

1 Rossi A P, Van Gasselt S. Planetary Geology. Springer International Publishing, 2018: 1-414.

2 Marvin U B. Geology: from an Earth to a planetary science in the twentieth century. Geological Society, London, Special Publications, 2002, 192(1), 17-57.

3 欧阳自远. 比较行星地质学. 地球科学进展, 1994, 9(2): 75-77.

4 肖龙, Greeley R, 曾佐勋, 等. 比较行星地质学的研究方法、现状和展望. 地质科技情报, 2008, (3): 1-13.

5 Greeley R, Bender K, Rappalardo R. Planetary Geology–A Teacher’s Guide with Activities in Physical and Earth Scienc-

es. National Aeronautics and Space Administration, 2013, 85: 127-136.

6 Head III J W. Surfaces and interiors of the terrestrial planets. The New Solar System// Beatty J K , Peterson C C , Chaikin A (Eds). Sky Publishing Corporation. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 157.

7 Head J W, Wood C A, Mutch T A. Geologic Evolution of the Terrestrial Planets: Observation and exploration have yielded fundamental knowledge of planetary evolution and have given rise to an exciting new view of Earth as a planet. American Scientist, 1977, 65(1): 21-29.

8 Carr M H. Geologic exploration of the planets: The first 50 years. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2013, 94(3): 29-30.

9 Hiesinger H, Head III J W. New views of lunar geoscience: An introduction and overview. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 1-81.

10 Faure G, Mensing T. Introduction to Planetary Science. Dordrecht: Springer, 2007.

11 Taylor L A. Resources for a lunar base: rocks, minerals, and soil of the moon. In NASA. Johnson Space Center, The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, 1991, 2: 361-377.

12 Schneider J. Future exoplanet research: science questions and how to address them. 2007. arXiv: 1712.07479. DOI: 10.1007/978-3-319-55333-7_163.

13 Balint T S, Kolawa E A, Cutts J A, et al. Extreme environment technologies for NASA's robotic planetary exploration. Acta Astronautica, 2008, 63(1-4): 285-298.

14 Palaszewski, B. Solar System Exploration Augmented by Lunar and Outer Planet Resource Utilization: Historical Perspectives and Future Possibilities. AIAA Aerospace Sciences Meeting 2014. doi: 10.2514/6.2014-0498.

15 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005.

16 Glass B P. Introduction to planetary geology. Cambridge: Cambridge University Press, 1982: 477 .

17 West Jr G S, Wright J J, Euler H C. Space and planetary environment criteria guidelines for use in space vehicle development 1977 revision. No. N-78-15146. Alabama: NASA Marshall Space Flight Center, 1977.

18 Klein H P. The Viking mission and the search for life on Mars. Reviews of Geophysics, 1979, 17(7): 1655-1662.

19 Peeters Z, Quinn R, Martins Z, et al. Habitability on planetary surfaces: interdisciplinary preparation phase for future mars missions. International Journal of Astrobiology, 2009, 8(4): 301.

20 Pajola M, Rossato S, Carter J, et al. Eridania Basin: an ancient paleolake floor as the next landing site for the Mars 2020 rover. Icarus, 2016, 275(03): 163-182.

21 Moriarty D P, Pieters C M. The Character of South Pole-Aitken Basin: Patterns of Surface and Subsurface Composition. Journal of Geophysical Research: Planets, 2018, 123(3): 729-747.

22 Zacny K, Paulsen G, Chu P, et al. The Icebreaker Drill System: Sample Acquisition and Delivery for the Lunar Resource Prospective Mission// 46th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: LPI, 2015: 1614

23 Yamamoto S, Wada J, Okabe N, et al. Transient crater growth in granular targets: An experimental study of low velocity impacts into glass sphere targets. Icarus, 2006, 183(1), 215-224.

24 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 261-280.

# Planetary Geology: "Extraterrestrial" Model of Geology

LI Xiongyao[1]  LIN Wei[2]  XIAO Zhiyong[3]  TANG Hong[1]  ZHAO Yuyan[1]  ZENG Xiaojia[1]

（1 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

2 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China）

**Abstract** Planetary geology is an interdisciplinary subject that develops from astronomy and geology. This subject mainly studies the formation and evolution of solid celestial bodies in the Solar System such as planets, satellites, asteroids, comets, and planetary rings by using the methods of traditional geology. With the development of planetary exploration, the research field of planetary geology has been expanding, covering planetary lithosphere, planetary surface environment, planetary resources, and the evolution of biological or habitable environment. Planetary geology and planetary exploration complement each other: planetary exploration provides an important research basis for the development of planetary geology, and the new discoveries of planetary geology can well promote the implementation of planetary exploration. However, the development of planetary geology in China is still relatively backward, and there are still many shortcomings in the research platform and scientific team. Planetary geology can help us to know the Earth beyond the Earth, promoting the development of Earth science. With the continuous development of planetary exploration, the constraints of planetary geology are becoming more and more obvious, which requires early layout and vigorous development to meet the urgent needs of discipline development and planetary exploration.

**Keywords** planetary geology, planetary lithosphere science, planetary environmental science, planetary resources science, astrobiology





**李雄耀** 中国科学院地球化学研究所研究员、博士生导师，中国空间科学学会理事。主要从事月球与行星表面环境过程研究。通过突破天体表面环境过程模拟的多项关键技术，建立研究平台，开发新方法，获得了太空风化过程以及矿物颗粒辐射带电特性的新认识，拓展了固态天体表面与环境相互作用过程研究方向。2013年入选“西部之光”人才项目，并获结题优秀；2014年入选中国科学院青年创新促进会，届满被评为优秀会员；2018年获侯德封矿物岩石地球化学青年科学家奖。E-mail：lixiongyao@vip.skleg.cn

**LI Xiongyao** Professor at the Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (CAS). His current research engages in lunar and planetary surface environmental processes. By breaking through key technologies of surface environmental process simulation of celestial surfaces, he has established research platform and developed series analysis methods. And he has also revealed the space weathering process and the radiation charging characteristics of dust particles on celestial surfaces. He was selected into the talent program of Western Light of Chinese Academy of Sciences in 2013, and the Chinese Academy of Sciences Youth Innovation Promotion Association in 2014, both of which ranked "excellent" at the end of project execution periods. In 2018, he won the Hou Defeng Young Scientist Award. E-mail: lixiongyao@vip.skleg.cn

■责任编辑：刘天星

## 参考文献（双语版）


1 Rossi A P, Van Gasselt S. Planetary Geology. Springer International Publishing, 2018.

2 Marvin U B. Geology: From an earth to a planetary science in the twentieth century. Geological Society, London, Special Publications, 2002, 192(1): 17-57.

3 欧阳自远. 比较行星地质学. 地球科学进展, 1994, 9(2): 75-77.

Ouyang Z Y. Comparative planetary geology. Advances in Earth Science, 1994, 9(2): 75-77. (in Chinese)

4 肖龙, Greeley R, 曾佐勋, 等. 比较行星地质学的研究方法、现状和展望. 地质科技情报, 2008, 27(3): 1-13.

Xiao L, Greeley R, Zeng Z X, et al. Methodology, achievements and prospects of comparative planetary geology. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(3): 1-13. (in Chinese)

5 Greeley R, Bender K, Rappalardo R. Planetary Geology–A Teacher's Guide with Activities in Physical and Earth Sciences. National Aeronautics and Space Administration, 2013, 85: 127-136.

6 Head III J W. Surfaces and interiors of the terrestrial planets. The New Solar System// Beatty J K , Peterson C C ,Chaikin A, Eds. Sky Publishing Corporation. Cambridge: Cambridge University Press, 1999, 157.

7 Head J W, Wood C A, Mutch T A. Geologic Evolution of the Terrestrial Planets: Observation and exploration have yielded fundamental knowledge of planetary evolution and have given rise to an exciting new view of Earth as a planet. American Scientist, 1977, 65(1): 21-29.

8 Carr M H. Geologic exploration of the planets: The first 50 years. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2013, 94(3): 29-30.

9 Hiesinger H. New views of lunar geoscience: An introduction and overview. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2006, 60(1): 1-81.

10 Faure G, Mensing T. Introduction to Planetary Science. Dordrecht: Springer, 2007.

11 Taylor L A. Resources for a lunar base: Rocks, minerals, and soil of the moon. In NASA. Johnson Space Center, The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, 1991, 2: 361-377.

12 Schneider J. Future exoplanet research: Science questions and how to address them. 2007. Handbook of Exoplanets: 2018.

13 Balint T S, Kolawa E A, Cutts J A, et al. Extreme environment technologies for NASA's robotic planetary exploration. Acta Astronautica, 2008, 63(1-4): 285-298.

14 Palaszewski B A. Solar System Exploration Augmented by Lunar and Outer Planet Resource Utilization: Historical Perspectives and Future Possibilities. AIAA Aerospace Sciences Meeting 2014. doi: 10.2514/6.2014-0498.

15 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005.

Ouyang Z Y. Introduction to Lunar Science. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005. (in Chinese)

16 Glass B P. Introduction to planetary geology. Cambridge: Cambridge University Press, 1982: 477.

17 West Jr G S, Wright J J, Euler H C. Space and planetary environment criteria guidelines for use in space vehicle development 1977 revision. No. N-78-15146. Alabama: NASA Marshall Space Flight Center, 1977.

18 Klein H P. The Viking mission and the search for life on Mars. Reviews of Geophysics, 1979, 17(7): 1655-1662.

19 Peeters Z, Quinn R, Martins Z, et al. Habitability on planetary surfaces: Interdisciplinary preparation phase for future Mars missions. International Journal of Astrobiology, 2009, 8(4): 301-315.

20 Pajola M, Rossato S, Carter J, et al. Eridania Basin: An ancient paleolake floor as the next landing site for the Mars 2020

rover. Icarus, 2016, 275: 163-182.

21 Moriarty D P I, Pieters C M. The character of south pole-aitken basin: Patterns of surface and subsurface composition. Journal of Geophysical Research: Planets, 2018, 123(3): 729-747.

22 Zacny K, Paulsen G, Chu P, et al. The Icebreaker Drill System: Sample Acquisition and Delivery for the Lunar Resource Prospective Mission// 46th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: LPI, 2015: 1614

23 Yamamoto S, Wada K, Okabe N, et al. Transient crater growth in granular targets: An experimental study of low velocity impacts into glass sphere targets. Icarus, 2006, 183(1): 215-224.

24 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 绕月探测工程的初步科学成果. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 261-280.

Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. Preliminary scientific achievements of the lunar exploration project. Scientia Sinica (Terrae), 2010, 40(3): 261-280. (in Chinese)